

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

低侵襲手術用空間確保マニピュレータに関する研究
Study on Workspace-Creation Manipulator
for Minimally Invasive Surgery

申請者

氏名

岡本	淳
Jun	Okamoto

専攻・研究指導
(課程内のみ)

生命理工学専攻 メディカル・ロボティクス研究

2006 年 1 月

「侵襲」とは、生体の内部環境の恒常性を乱す可能性のある外部からの刺激と定義されている。特に手術による侵襲のことを「手術侵襲」と呼ぶが、手術による剥離創の大きさ、組織破壊の程度、臓器の切除量、手術時間の長さ、出血量により侵襲は大きくなると考えられており、その大きさについて、近年血中のサイトカインの量を測定することで定量化が試みられている。サイトカインは組織の破壊と同時に産出され、本来の役割は生体防御・免疫機構を担う重要な生理活性物質であるが、過剰になると臓器に重い障害を引き起こす原因となる。特に高齢者では若年者より多くのサイトカインが産出されるため、同じ程度の手術でも若年者より侵襲は大きくなってしまう。従って、超高齢社会における QOL(Quality of Life) を向上させるには、あらゆる治療において、肉体的な負担の少ない「低侵襲手術」を実現させることが必須の課題となる。

そのような背景から、低侵襲手術の中でも特に内視鏡外科手術（小切開から内視鏡と術具を挿入し、術者がモニターを見ながら治療を行う方法）が 1990 年代初頭から急激に増加しており、日本内視鏡外科学会のアンケートによれば、1990 年から 2003 年末までに合計 487,111 例の内視鏡外科手術が施行されている。しかし 2000 年を境に、施行数の伸びは鈍化してきており、その原因としては（１）術式の難しさとそれに伴う合併症の多さが明らかになってきたこと、（２）現状の器具で治療可能な症例の範囲が確定してきたこと、が挙げられる。これは現在の内視鏡外科手術の限界を示すものであり、今後内視鏡外科手術をさらに多くの症例に展開し、しかも安全に遂行するには、新たな治療ツールの技術開発が必要となる。そこで近年、内視鏡外科手術の術具操作の難しさを解消する手段として、da Vinci[®]、Zeus[®]といった手術支援ロボティクスシステムが「術者の新しい手・目」として登場し、欧米を中心に多数の臨床を行っている。しかしこれらシステムは術者にとって画期的なツールであるものの、「ロボットにしかできない」新たな術式を提示しているとは言えず、費用対効果が見合わないことから本格的普及には至っていない。

本研究では、内視鏡外科手術をさらに多くの症例に展開して行くには「術者の新しいフィールド」を確保することが有効であるという新たな着眼点を基軸とする。通常の内視鏡外科手術では、主に腹腔や胸腔という容易に確保できるワークスペースを利用し、その中で術者は術野を確保し、術具を存分に操作することができる。しかしながら臓器の裏側や体内深部にまではアプローチする方法がなく、それが内視鏡外科手術適用範囲の限界となっていた。また、脳神経外科や整形外科領域においては容易に確保できるワークスペースが非常に限定されており、内視鏡外科手術の適用は非常に少なかった。これらワークスペースを創出する新たな技術を開発することで、これまで侵襲的であった多数の術式を低侵襲化することができると考えられる。これまで、このような目的における手術支援ロボティクスシステムの研究は行われていない。

以上を踏まえ本研究では，体内に任意のワークスペースを安全に創出するための，マニピュレータ設計・制御に関する方法論の確立を目指す．具体的には，臓器に対するリスクを考慮した安全性の高いマニピュレーション方法と，マスタ・スレーブシステムによる超多自由度マニピュレータの直感指向型空間確保操作について論ずる．対象症例は脳神経外科領域に設定する．最も繊細な臓器である脳を対象とした方法論を確立することで，他領域への展開を容易に行うことができる．

本論文は 7 章から構成される．以下に，各章の概要を示す．

第 1 章は序論であり，本研究の背景と目的を述べる章である．現状の内視鏡外科手術適用範囲を整理するとともに，手術支援ロボティクスシステムの研究開発動向を概観し比較を行うことで，本研究のコンセプトを明確にした．

第 2 章では，対象とする新しい術式として直径 20mm の小さな開頭から行う中大脳動脈付近の空間確保を設定し，それを実現するためのマニピュレータ設計論について述べた．まず，小開頭から脳内に空間を確保するには多自由度化された薄型構造が必要であり，変形挙動が予想しにくい脳実質の隙間に進入するには数値制御型，画像誘導型，自律型ではなく操縦型，マスタ・スレーブ方式の操作入力が適していることを論じた．また，脳挫傷・脳浮腫等の空間確保におけるリスクについて検討するとともに，脳実質の材料特性について関連研究の整理および予備実験を行い，その粘弾性挙動を確認した．次に，空間確保作業を保持・圧排（臓器に圧力をかけること）・進入の 3 つの手順に分類し，それぞれの手順を安全に遂行するにはマニピュレータの形状制御，トルク制御，メカニカルな剛性調節が有効なことを論じ，それら各制御モードを実現する冗長自由度マニピュレータのメカニズムについて，ワイヤと張力センサを用いた 2N 型の拮抗駆動方式により実現できることを示した．また，従来技術との比較により，術者がそれら各制御モードにおけるマニピュレータを直感的に操作するためには，省自由度のマスタ・マニピュレータによる新規操作法の開発が有効であることを示した．

第 3 章では，第 2 章の指針に基づき，空間確保マニピュレータの基本モデルの開発を行い，臓器を安全にマニピュレーションする各軸制御法の構築を行った．マニピュレータは空間確保というその目的から，可能な限りの薄型構造が望まれる．極端な薄型構造では関節プーリの採用を望むことは不可能であり，ワイヤ変位と角度変位，及びワイヤ張力と関節トルクの関係はそれぞれ非線形となるが，線形近似可能な新規関節構造を提案することで，この問題を解決し，厚さ 2mm，幅 7mm の水平方向と垂直方向の 2 自由度を有するユニバーサルジョイント型関節の開発を行った．また，2N 型駆動とワイヤ張力制御を基本とした，臓器に変位を与えすぎないワイヤ弾性補償型角度制御，応力緩和を利用した最小圧力での圧排を実現する関節トルクの直接制御，接触時の安全性を確保するメカニカルな関節剛性調節について，基本的性能を確認した．

第 4 章では，マニピュレータの形状制御，トルク制御における直感指向型マニピュレータ制御方法について提案した．従来のロボティクス理論においてはマニピュレータ先端座標系における位置・姿勢・力の制御が議論の中心であったが，今回の課題は任意形状の空間をマニピュレータ全体で確保することであり，そのための新たなマスタ・スレーブ方式の開発が課題となる．スレーブの形状制御においては，形状制御マトリクスを用いる方式と，仮想 3 次元球を用いる方式を提案した．前者は省自由度マスタの関節角度と多自由度スレーブの各関節角度を 1 対多数で関連づける方式で，その関連づけられた比例ゲインをマトリクスとして記述するものである．術者はマスタの操作画面上かマトリクスのパラメータを変更することにより，スレーブの可動範囲内において任意形状に変形することができる．また，後者はマスタで操作する仮想的な球の表面にスレーブの形状をフィッティングさせる方式であり，仮想球の 3 次元位置と半径を操作する 4 自由度マスタを操作することで，意図する形状を実現する．さらに，マニピュレータのトルク制御においても，トルク制御マトリクスを用いる方式と仮想 3 次元ポテンシャル場を用いる 2 方式を提案した．また，仮想空間上で形状制御の試行ができる術中シミュレータの開発と，制御モード間およびパラメータ変更後の形状遷移を安全に行うための，形状誤差を最小にする方法論についても導出した．これらの方式を組み合わせ，シミュレータ上にて典型的な空間確保動作のシナリオを構築した．

第 5 章では，第 3 章，第 4 章で考案した制御方式を搭載し，それらを実際の臨床の場で評価可能なシステムの開発について述べた．開発したシステムはパッシブ 5 自由度 + アクティブ 1 自由度（直動）の先端に 10 自由度の空間確保マニピュレータを備えたものであり，システムの姿勢によらず，ワイヤ経路長が不変となる機構的な特徴を持つ．また，10 自由度空間確保マニピュレータは形状とワイヤのバイアス張力の初期設定機能を持つ筒状のケースから出入りする方式で駆動され，追加した直動 1 自由度の変位量により，自由度が可変となっている．この機構に対応するため，第 4 章で考案した制御方式の拡張を行い，その基本的な制御特性について検証を行った．

第 6 章では第 5 章で開発したシステムを用いて *in vitro* における評価実験を行い，安全を確保するマニピュレーションと直感試行型の操作入力について評価を行い，システムの有効性を示すとともに，空間確保に最適な制御モード・操作入力方法の最適な組み合わせについて検討を行った．また，脳神経外科以外の症例における，提案手法の適用可能性について論じた．

第 7 章では本研究で得られた成果をまとめ，今後必要となる研究について述べた．

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	1. 吉澤愛子, 岡本淳, 藤江正克, “ロボット手術プランニングのための脳の力学的モデリング”, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.7, No.2, pp.105-113 (2005)
論文	2. A.Yoshizawa, J. Okamoto, H. Yamakawa, M. G. Fujie, “Robot Surgery based on the Physical Properties of the Brain -Physical Brain Model for Planning and Navigation of a Surgical Robot-”, Proc of International Conference on Robotics and Automation, pp.916-923 (2005)
論文	3. J. Okamoto, M. Iida, K. Nambu, M. G. Fujie, M. Umez, H. Iseki “A new method to extend applicable area of minimally invasive neurosurgery by brain retract manipulator”, In: Proc. of MICCAI, Vol.2878 of LNCS., pp.190-197 (2003)
論文	4. J. Okamoto, M. Iida, K. Nambu, M. G. Fujie, M. Umez, “Development of Multi-DOF Brain Retract Manipulator with Safety Method”, Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference. on Intelligent Robots and Systems, pp.2594-2599 (2003)
論文	5. J. Okamoto, M. Iida, K. Nambu, H. Okayasu, M. G. Fujie, M. Umez, H. Iseki, “Development of Multi-DOF Brain Retract Manipulator for Minimally Invasive Neurosurgery”, Proc. of the 17th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2003, pp.522-528 (2003)
講演	1. J. Okamoto, T. Hara, H. Iseki, M.G.Fujie, “Development of Surgical Assist Manipulator Securing Workspace in the Brain”, The 1st International Conference on Manufacturing, MachineDesign and Tribology, DDI-302 (2005)
講演	2. 岡本淳, 原知宙, 伊関洋, 藤江正克, “低侵襲手術用多自由度脳ヘラ型マニピュレータの開発 - 拮抗駆動実験モデルによる制御試験 -”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, 2A1-N-130 (2005)
講演	3. 岡本淳, 原知宙, 伊関洋, 藤江正克, “多自由度脳ヘラ型マニピュレータの開発 -拮抗駆動方式の検討-”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.87-88 (2004)
講演	4. 山本明広, 高信英明, 高村寧, 伊関洋, 岡本淳, 藤江正克, “多自由度脳ヘラ型マニピュレータ用マスタマニピュレータ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.89-90 (2004)
講演	5. 吉澤愛子, 岡本淳, 藤江正克, “手術ロボットプランニングとナビゲーションのための脳の力学的モデリング”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.221-222 (2004)
講演	6. 高信英明, 高村寧, 山本明広, 伊関洋, 岡本淳, 藤江正克, “低侵襲脳外科手術用マスタ・マニピュレータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P1-H-55 (2004)
講演	7. 原知宙, 吉澤愛子, 岡本淳, 藤江正克, “脳の力学的特性を考慮したロボット手術 -脳の力学的特性のモデリング-”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-H-66 (2004)
講演	8. 吉澤愛子, 岡本淳, 山川宏, 藤江正克, “脳の力学的特性を考慮したロボット手術 -手術ロボットナビゲーションのための脳の力学的モデリング-”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-H-65 (2004)
講演	9. 飯田益久, 岡本 淳, 藤江 正克, “水圧を用いた安全制御システムの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-H-63 (2004)
講演	10. 高信英明, 山本明広, 石原裕, 吉沢直之, 三浦宏文, 伊関洋, 岡本淳, 藤江正克, “低侵襲脳外科手術用マスタ・マニピュレータの研究”, 日本機械学会 第 16 回バイオエンジニアリング講演会”, pp. 367-368 (2004)
講演	11. 高信英明, 山本明弘, 三浦宏文, 伊関洋, 岡本淳, 藤江正克, 石原裕, 吉沢直之, “脳外科手術用マスタ・マニピュレータの開発と試作”, 日本ロボット学会学術講演会, 2F16 (2003)
講演	12. 高信英明, 山本明広, 石原裕, 吉沢直之, 三浦宏文, 伊関洋, 岡本淳, 藤江正克, “脳外科手術用マスタ・マニピュレータの研究”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.145-146 (2003)

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	13. 岡本淳, 飯田益久, 南部和哉, 藤江正克, 梅津光生, 伊関洋, “低侵襲手術用多自由度脳ヘラ型マニピュレータの開発 第 4 報-安全性に関する検討-”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’03 講演論文集, 2P2-2F-D1 (2003)
講演	14. 岡本淳, 飯田益久, 南部和哉, 藤江正克, 梅津光生, 伊関洋, “低侵襲手術用多自由度脳ヘラ型マニピュレータの開発 第 3 報 -臨床に向けたトータルなシステムの開発-”, 第 11 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.125-126 (2002)
講演	15. 岡本淳, 藤江正克, 梅津光生, 伊関洋, “低侵襲手術用多自由度脳ヘラ型マニピュレータの開発 第 2 報 -プロトタイプによる動物実験評価-”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’02 講演論文集, 1P1-B01 (2002)
講演	16. 岡本淳, 藤江正克, 梅津光生, 伊関洋, “低侵襲手術用脳ヘラ型マニピュレータの開発”, 第 10 回日本コンピュータ外科学会論文集, pp.155-156 (2001)
その他 (論文)	1. 岡安はる奈, 岡本淳, 藤江正克, 伊関洋, “液圧駆動脳ヘラマニピュレータの開発-マニピュレータのメカニズムと要素試作機による特性評価-“, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.7 No.1, pp.51-58 (2005)
(論文)	2. H. Okayasu, J. Okamoto, M. G. Fujie, H. Iseki, “Development of a hydraulically-driven flexible manipulator for neurosurgery”, Robotics and Mechatronics, Vol.17 No.2, pp.149-157 (2005)
(論文)	3. Y. Kobayashi , J. Okamoto, M. G. Fujie, “Position Control of Needle Tip with Force Feedback and Liver Model”, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2005, pp.719-724, (2005)
(論文)	4. H. Okayasu, J. Okamoto, M. G. Fujie, H. Iseki, “Development of a Hydraulically-driven Flexible Manipulator Including Passive Safety Method”, Proc of International Conference on Robotics and Automation 2005, pp.2901-2907 (2005)
(論文)	5. Y. Kobayashi, J. Okamoto and M. G. Fujie, “Physical Properties of Liver and Development of Intelligent Manipulator for Needle Insertion”, Proc. of International Conference on Robotics and Automation 2005, pp.1644-1651 (2005)
(論文)	6. Y. Kobayashi, J. Okamoto, M. G. Fujie, “Physical Properties of the Liver for Needle Insertion Control”, Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2960-2966 (2004)
(論文)	7. Y. Kobayashi, J. Okamoto, M. G. Fujie, “Physical property of liver for robot-assisted needle insertion”, Proc. of the 18th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2004, pp.1335 (2004)
(論文)	8. H. Okayasu, J. Okamoto, M. G. Fujie, M. Umez, H. Iseki, “Development of a hydraulic-driven flexible manipulator for neurosurgery”, Proc. of the 17th International Congress and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2003, pp.607-612 (2003)
(講演)	1. 川村和也, 岡本淳, 藤江正克, “ロボット手術用リアルタイムシミュレーション技術の開発 -遠隔ロボット手術の最適環境構築-”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 2J21 (2005)
(講演)	2. 平林昌洋, 林延明, 岡本淳, 村津裕嗣, 黒坂昌弘, 藤江正克, “膝靱帯再建手術支援システムの研究”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 3J11 (2005)
(講演)	3. 岩森順子, 岸宏亮, 岡本淳, 竹村博文, 橋爪誠, 藤江正克, “臓器拍動補償機能を有した冠状動脈バイパス手術支援ロボット”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 3J17 (2005)
(講演)	4. 豊田和孝, 岡本淳, 藤江正克, “低侵襲手術システムの構築を目的とするマスタマニピュレータの開発”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 3J16 (2005)

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
（講演）	5. 木田恭平, 平林昌洋, 岡本淳, 村津裕嗣, 黒坂昌弘, 藤江正克, “人工膝関節置換術のための定量的手術支援ロボットシステムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2A1-N-129 (2005)
（講演）	6. 岩森順子, 岸宏亮, 岡本淳, 藤江正克, “肘関節を有する多自由度鉗子マニピュレータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2A1-N-129 (2005)
（講演）	7. 小林洋, 岡本淳, 藤江正克, “肝臓の力学的特性を規範とした針の先端の位置制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2A1-N-121 (2005)
（講演）	8. 三田裕, 小林洋, 岸宏亮, 岡本淳, 藤江正克, “MRI 対応小型穿刺マニピュレータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2P1-N-124 (2005)
（講演）	9. 岡安はる奈, 岡本淳, 藤江正克, 伊関洋, “手術用液圧駆動脳ヘルマニピュレータ-多関節化とモデル化-”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2A1-N-131 (2005)
（講演）	10. 梅田剛史, 小林洋, 岡本淳, 藤江正克, “臓器拍動補償機能を有した冠状動脈バイパス手術支援ロボット”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2A1-N-123 (2005)
（講演）	11. T. Umeda, J. Okamoto, M.G. Fujie, “Development of Heartbeat Sensing System for Robotic Surgery”, The 1st International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, DDI-402 (2005)
（講演）	12. H. Okayasu, J. Okamoto, M. G. Fujie, H. Iseki, “A new approach to minimally invasive neurosurgery with passive manipulator”, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2005, pp.1362 (2005)
（講演）	13. K.Kawamura, J.Okamoto M.Fujie, “QoS optimal conditions for robotic tele-surgery”, Computer Assisted Radiology and Surgery CARS 2005, PO-12 (2005)
（講演）	14. M. Oura, Y. Mita, Y. Kobayashi, K. Kishi, J. Okamoto, M. G. Fujie, “Development of MRI Compatible SCARA-type Manipulator Using New Gimbals Mechanism”, The 1st Asian Symposium on Computer Aided Surgery, OR-11 (2005)
（講演）	15. M. Yanagihara, J. Okamoto, N. Mitsui, H. Yano M. G. Fujie, “Development of Surgery Assisting Manipulator s for RAO”, The 1st Asian Symposium on Computer Aided Surgery, OR-17(2005)
（講演）	16. 平林昌洋, 林延明, 岡本淳, 村津裕嗣, 黒坂昌弘, 藤江正克, “ 定量的評価に基づいた靱帯再建ロボットシステム～第 1 報靱帯固定時の姿勢と張力の定量化～ ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.51-52 (2004)
（講演）	17. 柳原勝, 岡本淳, 三井教寛, 矢野英雄, 藤江正克, “ RAO における空間確保マニピュレータの開発 -空間確保のための機構と制御の試作- ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.57-58 (2004)
（講演）	18. 森山寛之, 柳原勝, 岡本淳, 藤江正克, “ 筋繊維特性による RAO 手術ロボット自律制御の検討 ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.59-60 (2004)
（講演）	19. 小林洋, 岡本淳, 藤江正克, “ 知的な穿刺ロボットの開発～コンセプトと実験機の開発～ ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.85-86 (2004)
（講演）	20. 岡安はる奈, 岡本淳, 伊関洋, 藤江正克, “ 低侵襲手術に向けた液圧駆動脳ヘルマニピュレータの開発（第 3 報）多関節化とその検討 ”, 第 13 回日本コンピュータ外科学会大会論文集, pp.85-86 (2004) (講演他 10 件)
（特許）	特願 2003-139619 医療用先端マニピュレータ
（特許）	特願 2003-145056 医療用マニピュレータ
（特許）	特願 2003-139620 医療用ロボットの安全制御システム